文章编号: 1008-1542(2008)01-0036-04

智能模糊自调整 PID 控制器在发酵过程 pH 值控制中的应用

何术利[1], 周海燕[2], 洪厚胜[2]

(1. 南京工业大学自动化学院, 江苏南京 210009; 2. 南京工业大学制药与生命科学学院, 江苏南京 210009)

摘 要: 智能模糊自调整 PID 控制器克服了常规 PID 控制方法积分饱和现象, 结合了仿人智能和模糊控制的优点, 引入了智能积分环节, 应用在发酵过程 pH 值控制系统中, 缩短了系统调节时间, 提高了系统的稳定性和响应速度, 提高了发酵产品的产量和质量。

关键词: 模糊自整定; PID; pH 值; 发酵

中图分类号: TP181 文献标识码: A

Application of intelligent and fuzzy PID adaptive controller on biology fermentation pH control system

HE Shu-li[1], ZHOU Hai-yan[2], HONG Hou-sheng[2]

(1. College of Automation, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China; 2. College of Life Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China)

Abstract: Intelligent and fuzzy PID adaptive controller has overcome the integral saturation phenomenon of normal PID controller by combining strongpoint of Human-simulation Intelligent and fuzzy control, and by importing intelligent integral method. Application of it on biology fermentation pH control system has shorten the system adjust time, improved the system stability and respond speed, increased the output and quality of ferment products.

Key words: fuzzy self-tuning; PID; pH value; fermentation

发酵过程中, pH 值具有大滞后、非线性、时变性且难以建立精确的数学模型等特点。常规 PID 控制方法设计简单, 可靠性高, 稳定性好, 但是对非线性、大时滞的对象和模型未知或难以精确建模的复杂对象难以实现有效控制。与传统 PID 控制相比, 对于模型未知的、大滞后的非线性系统, 采用基于模糊控制方法可得到较满意的效果[1]。而将模糊控制与常规 PID 控制相结合, 利用模糊推理判断的思想, 根据不同的 e 和 ec 对 PID 的参数 K_P, K_I, K_D 进行在线自整定, 同时引入仿人智能积分算法就可以兼顾三者的优点, 这就是基于智能模糊推理的自调整 PID 控制器。该算法适合控制非线性、大时滞的对象和难以精确建模的复杂对象。

在此以 15 L 小型发酵罐为控制对象, 进行了 pH 值控制系统的设计。

收稿日期: 2007-07-12; 责任编辑: 李 穆

作者简介: 何术利(1982-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事微生物发酵过程控制及嵌入式控制系统方面的研究。

1　仿人智能积分算法[2]

为了进一步完善 PID 控制作用, 对积分部分作了一定改动, 引入智能积分控制。在图 1 中: a) 为系统测量值曲线; b) 为系统偏差曲线; c) 为积分曲线; d) 为仿人智能积分曲线。在 c) 的积分曲线区间(*a*, *b*) 和(*b*, *c*) 中, 由于系统出现超调, 应该使控制量加上一个负量控制, 以压低超调, 尽快降低误差。但在(*b*, *c*) 区间中的常规积分控制作用却和正确的控制策略相反, 导致系统超调不能迅速降低, 延长了系统的过渡时间。在积分曲线 (*c*, *d*) 段, 应引入积分作用; 在(*d*, *e*) 段, 应取消此积分作用。为了克服上述积分控制作用的缺点, 引入如图 1 d) 中的积分曲线, 即仅在(*a*, *b*) 、(*c*, *d*) 、(*e*、*f*) 等区间上进行积分, 这种积分能够为积分控制作用及时地提出正确的附加控制量, 能有效地抑制系统误差的增加; 而在(0, *a*) , (*b*, *c*) 及(*d*, *e*) 等区间上, 取消积分作用, 有利于系统借助于惯性向稳态过渡。考虑到偏差及偏差变化的极值点, 可以把引入智能积分的条件综合如下(*e* 为偏差。e_c 为偏差变化率) [3]:

当 $e \times e_c > 0$ 时或 $e_c = 0$ 且 $e \neq 0$, 对偏差进行积分;

当 $e \times e_c < 0$ 时或 $e = 0$, 不对偏差进行积分。

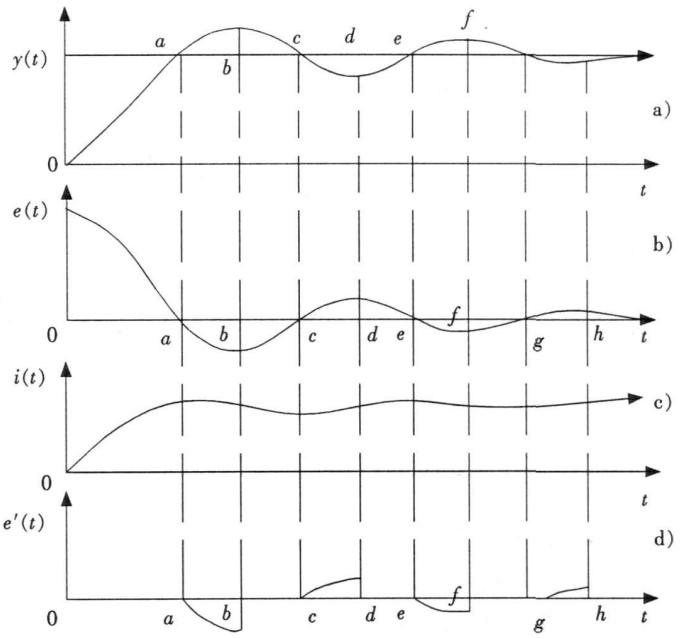

图 1　仿人智能积分

Fig. 1　Integral of PID and human-simulation intelligent

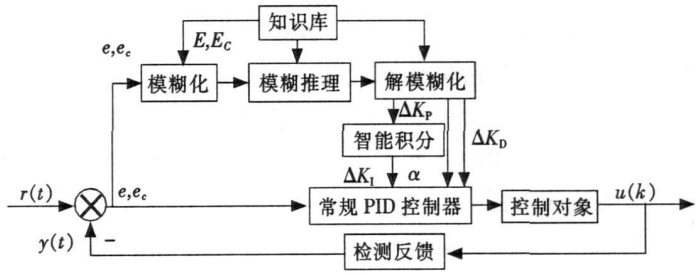

图 2　智能模糊自整定 PID 控制器结构图

Fig. 2　Sketch map of intelligent self-adjust fuzzy PID controller

2　智能模糊自调整 PID 控制器设计[4]

2.1　控制器结构及整定原则

智能模糊自调整 PID 控制器结构见图 2, 其中: $r(t)$ 为系统设定值; $y(t)$ 为系统反馈值; $u(k)$ 为系统输出; 偏差 $e = r(t) - y(t)$, $e_c = \mathrm{d}e/\mathrm{d}t$ 为偏差变化率。

根据参数 K_P, K_I, K_D 对系统输出特性的影响情况, 可归纳出系统在被控过程中对于不同的偏差 e 和偏差变化率 e_c, 参数 K_P, K_I, K_D 的自整定原则如下。

1) 当偏差 e 较大时, 为了加快系统的响应速度, 并防止因开始时偏差 e 的瞬间变大可能引起的微分过饱和而使控制作用超出许可范围, 应取较大的 K_P 和较小的 K_D, 通常取 $K_I = 0$。

2) 当偏差 e 和偏差变化率 e_c 为中等大小时, 为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度, K_P 值应取小一些; 在这种情况下, K_D 的取值对系统影响很大, 也应取小一些; K_I 的取值要适当。

3) 当偏差 e 较小时, 为了使系统具有较好的稳态性能, 应增大 K_P 和 K_I 值, 同时为避免输出响应在设定值附近振荡, K_D 取值应适当。其原则是: 当偏差变化率 e_c 较小时, K_D 取大一些; 当偏差变化率 e_c 较大时, K_D 取较小的值; 通常 K_D 为中等大小。

2.2　模糊控制规则表的建立

参数的整定规则是控制器的核心, 根据上述 PID 参数 K_P, K_I 和 K_D 对系统输出特性的影响情况、PID 参数整定原则及操作人员和专家的经验知识, 得到针对 ΔK_P, ΔK_I, ΔK_D3 个参数分别整定的模糊规则表, 见表 1—表 3。

2.3　模糊推理算法

根据需要, 控制器采用“二输入、三输出”的形式, 将系统偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为模糊控制器的输入变量, 以 ΔK_P, ΔK_I, ΔK_D3 个参数作为输出变量。

表 1 ΔK_P 控制规则表

Tab. 1 Table of ΔK_P control regulation

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_I 的模糊规则表

Tab. 2 Table of ΔK_I control regulation

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	ZO	ZO	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	ZO	ZO	ZO
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	ZO	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	ZO	PM	PB	PB

E 和 E_C 的基本论域为$[-2, 2]$和$[-4, 4]$, 输出变量的基本论域为$[0, 2]$。

定义 E 和 E_C 模糊集上的论域为

$$E, E_C, K_P, K_I, K_D = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\},$$

并设其模糊子集为

$E, E_C, K_P, K_I, K_D = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 子集中元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。其中量化因子 $K_e = 6/2 = 3$, $K_{e_c} = 6/4 = 1.5$, 它们将 E 和 E_C 从基本论域范围转换为模糊论域范围。

表 3 ΔK_D 的模糊规则表

Tab. 3 Table of ΔK_D control regulation

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

取输入 E, E_C 及输出 K_P, K_I 和 K_D 的隶属度函数为三角形隶属函数曲线分布, 可得出各模糊子集的隶属度函数曲线。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制规则, 应用模糊合成推理算法求出模糊集合, 采用最大隶属度法进行解模糊判决, 从而得到了各参数模糊调整控制表。

定义 K_P, K_I, K_D 参数调整算式如下:

$$\begin{cases} K_P = K_{P_0} + \{E, E_C\} K_P = K_{P_0} + \Delta K_P; \\ K_I = \alpha(K_{I_0} + \{E, E_C\} K_I) = \alpha(K_{I_0} + \Delta K_I); \\ K_D = K_{D_0} + \{E, E_C\} K_D = K_{D_0} + \Delta K_D。 \end{cases} \tag{1}$$

其中: $K_{P_0}, K_{I_0}, K_{D_0}$ 分别为采用常规整定方法得到的 K_P, K_I, K_D 的初始值; α 为 K_I 的比例因子; α 经过仿人智能积分处理后的值如式(2)所示。

$$\begin{cases} \alpha = 1 & (e \times e_c > 0 \text{ 或 } e = 0 \text{ 且 } e_c \neq 0); \\ \alpha = 0 & (e \times e_c < 0 \text{ 或 } e = 0)。 \end{cases} \tag{2}$$

在线运行过程中, 通过微机测控系统不断地检测系统的输出响应值, 并实时计算出偏差和偏差变化率, 然后将它们模糊化得到 E 和 E_C, 通过查询模糊调整矩阵即可得到 K_P, K_I, K_D3 个参数的调整量, 完成对控制器参数的调整。

3 实际应用

pH 值是微生物生长的重要环境参数之一, 在发酵过程中必须严格加以控制, 否则会严重影响微生物代谢的进行和代谢产物的合成[5]。

由于发酵过程 pH 值调节对象的特性的时变性较强, 对这种非线性程度大和滞后较严重的对象, 调节不当就很容易发生超调或失调, 为了保证系统不出现超调或失调, 又有较快的过渡过程, 每次投入使用前系统自动对所加调节剂进行酸碱判断, 保证系统不会出现大的超调和失调。

笔者采用单片机控制蠕动泵的通断时间控制调节剂的剂量来调节 pH 值。数字 PID 控制器采用位置式

PID 控制算法, 系统的输出 $u(k)$ 可以表示为

$$u(k) = K_P \times e(k) + K_I \times \sum_{j=0}^{k} e(k) + K_D \times [e(k) - e(k-1)]。 \quad (3)$$

系统每 30 s 对 pH 值进行检测, 与设定值比较后, 得到系统偏差 e 和偏差变化率 e_c, 如果 $|e| > 2$, 偏差较大, 系统输出最大, 即 $u(k) = 100$; 如果 $|e| \leqslant 2$, 经模糊化后, 查询模糊控制规则表, 并计算得到 K_P, K_I, K_D 值进行 PID 控制算法从而得到系统输出 $u(k)$。

基于 51 单片机的智能模糊自调整 PID 控制算法程序流程步骤如下。1) 连续 AD 采样 10 次, 去除最大和最小算术平均值滤波算法。2) 计算系统偏差, 和偏差变化率, 查控制规则表, 确定 K_P, K_I, K_D 值。3) 进行 PID 程序计算。4) 执行系统输出, 将 PID 程序计算结果转化为蠕动泵的通断时间。设 T 为程序执行周期, T_I 为蠕动泵最大开启时间, t 为一个基本输出时间单位, $t = T_I/100$, 则系统执行时间 $T_1 = u(k) \times t$, 由于 T_I 较大, 采用时间中断方法, 即用单片机 T_0 产生中断, 在中断程序中每间隔 t 时间对 $u(k)$ 进行递减, 当 $u(k)$ 减为 0 时, 即 T_1 时间到, 系统停止输出。5) 等待下一个程序执行周期, 重复 1)。

T_I 的选取在不同的时候、对不同的对象各不相同。选取过小, 调节阀反应过于迅速, 容易引起系统波动, 阀体经常性动作, 降低使用寿命; 选取过大, 调节阀反应迟钝, 使整个系统的调节时间加长。因此必须根据实际工况, 权衡相互之间的关系, 选取一个恰当的控制周期, 这对系统的整体性能有很大的影响[6]。

系统实际运行输出曲线见图 3, 图中横坐标单位为 min。

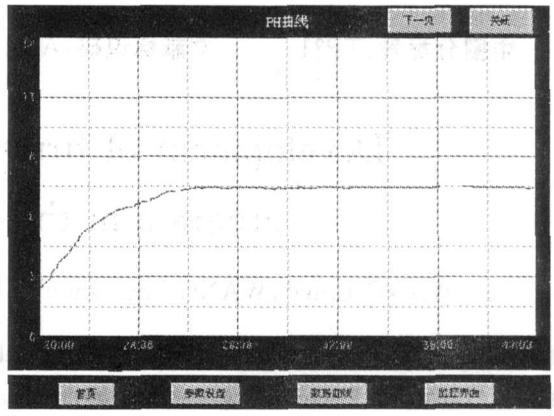

图 3　pH 值控制实验效果图

Fig. 3　Sketch map of fermentation pH control

4　结　语

试验证明, 将智能模糊自调整 PID 控制器应用在发酵过程 pH 值控制系统中, 既提高了系统控制精度, 缩短了系统调节时间, 又保证了系统不会出现超调和失调, 实际运行中, 发酵液中的实际 pH 值缓慢接近设定值, 本系统控制精度为 ±0.05。

参考文献:

[1] 于广平, 张　平, 魏松岩, 等. 仿人智能 PID 控制及在污水处理溶解氧控制中的应用[J]. 微计算机信息, 2006, 22(2): 13-15.
[2] 陈　众, 严　伟, 李祖枢. 基于 HSIC 的非线性 PID 控制器[J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 695-696.
[3] 李丙才, 姜映红, 叶碧成. 啤酒发酵过程模糊智能 PID 控制[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(6): 68-70.
[4] 孟　宇, 彭晓华, 张　浩. 模糊自适应整定 PID 控制及其仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2006, (6): 92-93.
[5] 南忠良, 严新忠. 微生物发酵过程环境控制系统的研究[J]. 天津轻工业学院学报, 2002, (3): 5-6.
[6] 吴小许, 孙　瑜, 黄　敏. 数字量调节阀的控制算法研究与应用[J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31(2): 61-63.

(上接第 35 页)

4　结　语

笔者针对 PDoS 攻击提出了一种两步检测法, 此检测法的出发点是基于异常流量剧烈波动的特性。首先用小波分析来提取流量的特性, 然后用 CUSUM 算法来检测突变点。通过实验证明此方法可以实时有效地检测出 PDoS 攻击, 同时通过改进的自调整 CUSUM 算法消除了累积造成的负面影响, 从而降低了误报率。

参考文献:

[1] DELIO M. New Breed of Attack Zombies Lurk[EB/OL]. http://www.acm.org/technews/articles/2001-3/0514m.html, 2001-05-14.
[2] KUZMANOVIC A, KNIGHTLY E. Low-rate TCP-targeted denial of service attacks[A]. ACM SIGCOMM[C]. Karlsruhe: ACM, 2003.
[3] BURRUS C, GOPINATH R, GUO H. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer[M]. NJ: Prentice Hall, 1998.
[4] BRODSKY B, DARKHOVSKY B. Non-Parametric Statistical Diagnosis Problems and Methods[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.